

УДК 621.914:674:004

**В. В. Раповец<sup>1</sup>, С. В. Медведев<sup>2</sup>, И. К. Клепацкий<sup>1</sup>**(V. V. Rapovets<sup>1</sup>, S. V. Medvedev<sup>2</sup>, I. K. Klepackij<sup>1</sup>)(<sup>1</sup>БГТУ, <sup>2</sup>ОИПИ, г. Минск, РБ)

E-mail для связи с авторами: dosy@bstu.unibel.by, medv@newman.bas-net.by

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ  
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
В СРЕДЕ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА LS-DYNA**

**METHODS FOR SIMULATING MILLING OF WOOD MATERIALS  
IN THE ENVIRONMENT OF LS-DYNA NONLINEAR ANALYSIS**

*В статье сформированы граничные условия суперкомпьютерных расчетов, разработана и предложена к использованию методика проведения вычислительных экспериментов с использованием механизма дискретных частиц по виртуальному резанию древесного анизотропного материала выбранным типом насадного фрезерного инструмента. Представлены корректные геометрические и конечно-элементные модели с высокой детализацией анизотропного обрабатываемого древесного материала и перспективной фрезы с наноразмерной режущей вставкой, создающей предпосылки для реализации процессов самозатачивания инструмента в процессе работы.*

*Рассмотрены подходы отражения анизотропных свойств древесных материалов в вычислительных суперкомпьютерных экспериментах, которые требуют более детального рассмотрения.*

*In this article, boundary conditions for supercomputer preliminary calculations are formed, a methodology for conducting computational experiments using the mechanism of discrete particles for virtual cutting of wood anisotropic material with the selected type of milling tool is developed and proposed. Correct geometric and finite element models with high detail of anisotropic processed wood material and a perspective cutter with a nano-sized cutting insert, which creates the pre-requisites for the implementation of self-sharpening tools in the process, are presented.*

*Approaches to reflecting the anisotropic properties of wood materials in computational supercomputer experiments, which require a more detailed consideration, are considered.*

Предложенная методика проведения вычислительных экспериментов ставит целью работы выявить зависимости характеристик процесса резания от высокоскоростных режимов, что позволяет исследовать параметры режимов обработки, учитывая изменение физико-механических свойств от сердцевинной части к заболонной при изменении ее относительной влажности, а также изменение трехмерного напряженно-деформированного состояния древесины после удаления влаги в структуре (при сушке).

Использование дорогого импортного оборудования и фрезерного инструмента на деревообрабатывающих производствах республики для обработки материалов на основе древесины в каркасах, фасадах мебели и строительных изделий, повышение требований к условиям работы высокопроизводительных машин требует оптимизации деревообработки, параметров конструкций режущих инструментов. В качестве критериев оптимизации таких технологических процессов наиболее часто используются производительность, энергоемкость, себестоимость изделия, обработки и др.

Для получения выходных данных и построения обозначенных закономерностей проводятся длительные лабораторные и производственные эксперименты с последующим анализом большой базы полученных данных. В связи с этим снижение затрат энергетических и материальных ресурсов, сокращение времени на проведение натуральных экспериментов за счет моделирования и оптимизации параметров сложных высокоскоростных процессов при механической обработке фрезерным инструментом с применением суперкомпьютерных вычислительных технологий является актуальной задачей.

Методы оптимизации высокоскоростных процессов фрезерования древесины и древесных материалов с использованием полученных закономерностей [1] должны обеспечивать требуемые характеристики производительности, себестоимости, энергоёмкости и качества продукции и быть устойчивыми к влиянию неопределённых факторов.

Для совершенствования и оптимизации высокоскоростных процессов фрезерования анизотропных материалов (древесины и древесных материалов), параметров эксплуатируемого режущего инструмента и технологических режимов обработки необходимо моделирование с высокой степенью детализации результатов и построение основных технико-экономических характеристик таких процессов с возможностью их использования в современных деревообрабатывающих машинах на производстве [2, 3].

В результате выполненных научных исследований разработаны геометрические и конечно-элементные модели обрабатываемого анизотропного материала и режущего инструмента с использованием механизма дискретных частиц, проведены предварительные суперкомпьютерные вычислительные эксперименты в мультипроцессорной среде LS-DYNA [4].

Процесс моделирования в подобных вычислительных средах позволяет обозначить несколько подходов отражения анизотропных свойств древесных материалов в вычислительных суперкомпьютерных экспериментах, которые требуют более детального рассмотрения. Удаётся выделить как минимум 3 неальтернативных подхода:

1) первый подход базируется на достаточно сложном описании модели материала пакета LS-DYNA – MAT\_WOOD\_ {OPTION};

2) суть второго подхода в следующем: анизотропия механических свойств может воспроизводиться за счёт создания своего рода «слоеного пирога», в котором по известным закономерностям изменяются свойства внутренних и наружных слоёв обрабатываемого древесного образца древесины;

3) третий подход заключается в предположении одинаковых механических свойств образца древесины. Анизотропия в известной степени может воссоздаваться приложением внешних уравновешенных сил к необрабатываемым поверхностям. Эти силы практически эквивалентны силам, возникающим при просушивании древесины, приводящие к её растрескиванию, короблению и формированию внутреннего напряжённого-деформированного состояния.

Вычислительные суперкомпьютерные эксперименты на параллельных архитектурах СКИФ выполнялись в лицензионном пакете нелинейного динамического анализа LS-DYNA [5].

Первоначально была сформирована в пакете SolidWorks трёхмерная геометрическая твердотельная модель эффективной фрезы для обработки натуральной древесины и древесных материалов. Построена модель фрезерного инструмента (ножа) с наноразмерной вставкой из тугоплавкого износостойкого материала, обеспечивающей в процессе работы эффект самозатачивания (рис. 1).

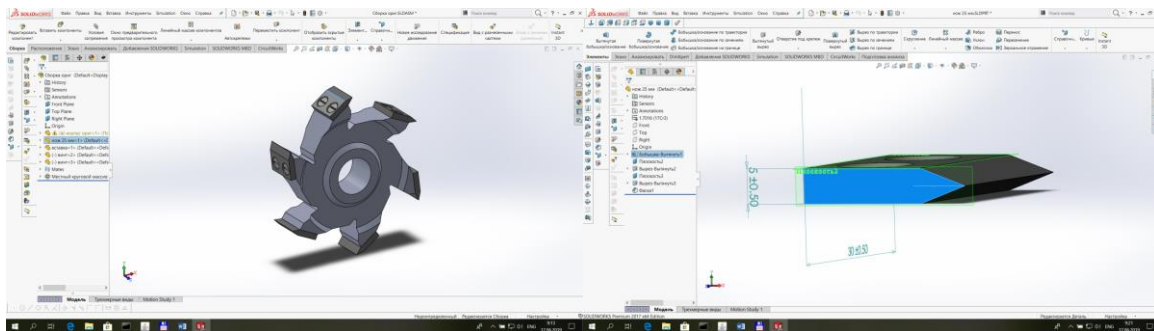


Рис. 1. Трехмерная геометрическая твердотельная модель эффективной фрезы, сформированная в пакете SolidWorks, и ножа с наноразмерной вставкой

В геометрическую модель фрезы с целью ее конструктивного упрощения при выполнении последующих расчетов в пакете LS-DYNA авторами внесены определенные изменения. Это обеспечило возможности формирования корректных конечно-элементных моделей обрабатываемого анизотропного материала и режущего инструмента (рис. 2, 3) [1].

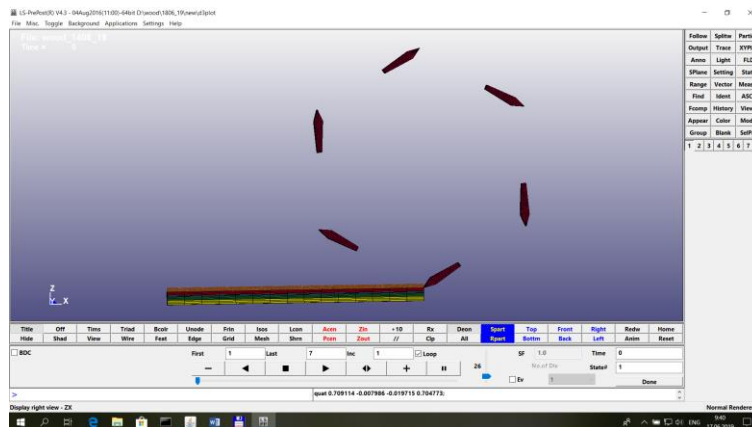


Рис. 2. Конечно-элементная модель фрезерного инструмента

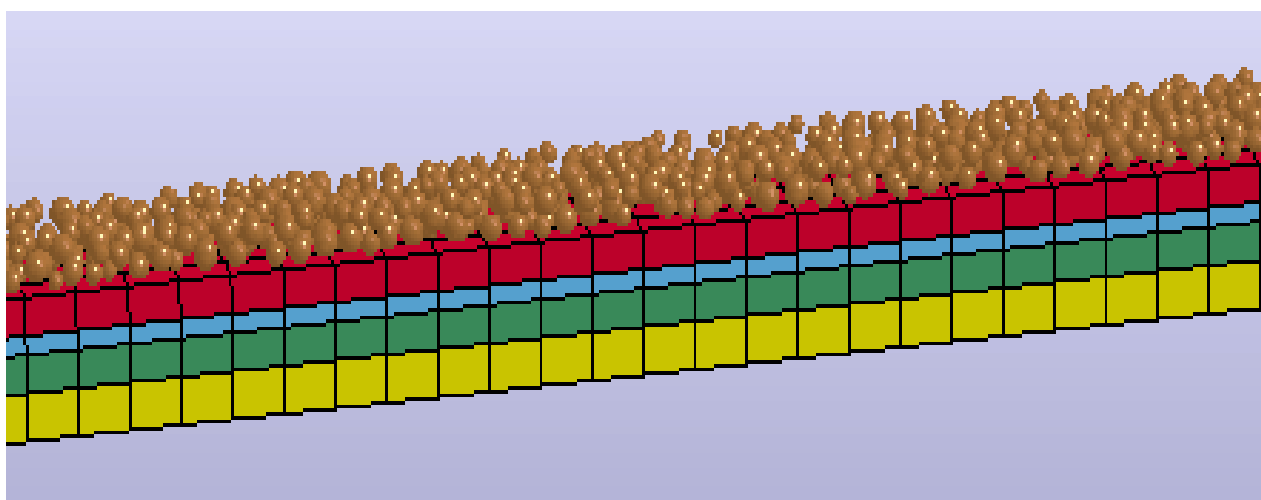


Рис. 3. Конечно-элементная модель обрабатываемого древесного материала (верхний слой представлен набором дискретных частиц)

На специальном языке описания пакета LS-DYNA указывались следующие карты:

- для инициализации дискретных частиц: \*CONTROL\_DISCRETE\_ELEMENT;
- для указания части модели, использующих дискретные частицы: \*PART, \*SECTION\_SOLID, \*MAT\_ELASTIC;
- для инициализации геометрических объемов, в которых дискретные частицы будут взаимодействовать с моделями фрезы и режущей пластины: \*DEFINE\_BOX, \*DEFINE\_DE\_ACTIVE\_REGION, \*DEFINE\_DE\_BOND;
- карта изменения во времени скорости горизонтальной подачи древесного материала при встречном фрезеровании: \*DEFINE\_CURVE;
- карта изменения во времени угловой скорости вращения фрезы при встречном фрезеровании древесины: \*DEFINE\_CURVE;
- карта воздействия сил гравитации на все элементы трехмерной динамической сцены \*DEFINE\_CURVE\_TITLE.

В проведенных вычислительных суперкомпьютерных экспериментах удалось эффективно совместить макроразмеры фрезы и обрабатываемой заготовки с микроразмерами режущей пластины и параметрами дискретных частиц, использование которых особенно эффективно на параллельных вычислительных архитектурах [6, 7, 8].

В результате выполненных суперкомпьютерных экспериментов на параллельных архитектурах «СКИФ» в лицензионном пакете нелинейного динамического анализа LS-DYNA по созданным моделям получены верифицированные значения сил резания (давления) на поверхностях ножа, значений мощности резания, параметров технологической стойкости лезвия при обработке древесины как анизотропного материала (рис. 4, 5) [9]. Представленные результаты могут быть использованы для построения математических моделей и разработки методов оптимизации и адаптивного управления параметрами технологических процессов высокоскоростной механической обработки древесных материалов, позволяющих прогнозировать рациональные режимы резания и конструкции ресурсосберегающего инструмента.

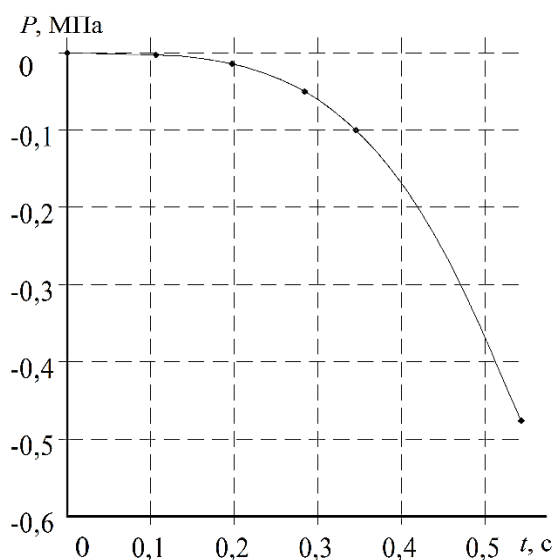


Рис. 4. График изменения во времени давления (усилий резания, мощности) на режущих поверхностях ножа с наноразмерной вставкой фрезы

Динамическое взаимодействие модели фрезы с моделью древесного материала, представленного набором дискретных частиц, показано на рисунке 5.

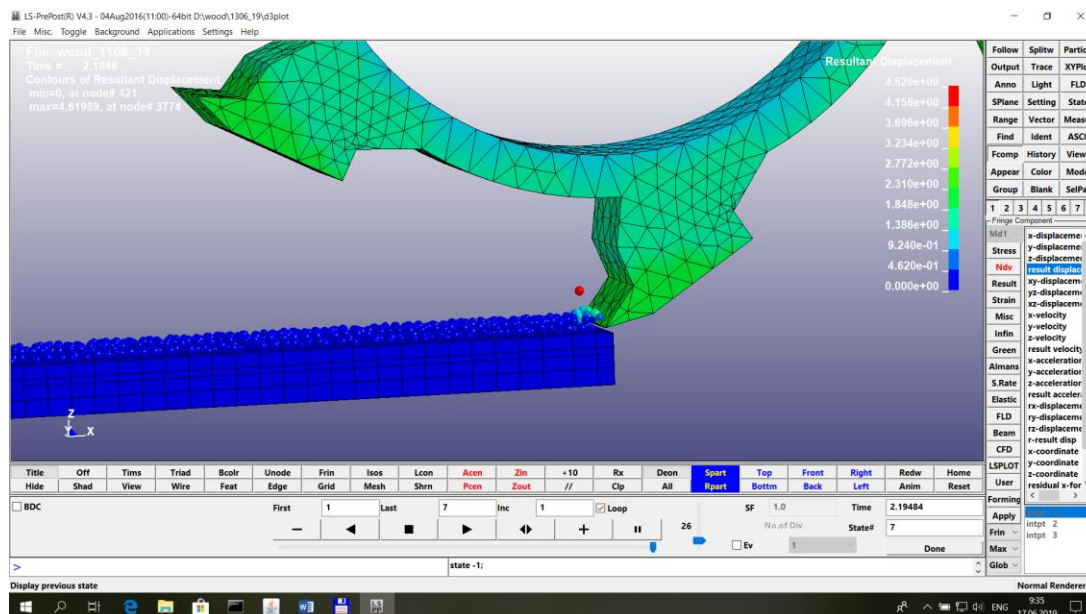


Рис. 5. Динамическое взаимодействие фрезы с моделью древесного материала, представленного набором дискретных частиц

В качестве вычислительных суперкомпьютерных ресурсов использовались кластеры «СКИФ – GPU-NEXT», «СКИФ – GEO – Office», а также самый высокопроизводительный на данный момент в РБ кластер «СКИФ – GEO – ЦОД».

Из проведенных вычислительных основных и дополнительных экспериментов напрашивается вывод о влиянии величины крутящего момента на параметры, определяющие энергетические затраты процесса высокоскоростной обработки древесных материалов. Усилия резания имеют определенную тенденцию к снижению при возрастании крутящего момента на исполнительном режущем инструменте.

Полученные результаты могут использоваться для моделирования и оптимизации параметров сложных высокоскоростных процессов механической обработки древесины и древесных материалов при выполнении научных исследований, что позволит существенно повысить эффективность действующего деревообрабатывающего производства.

Данный вывод заслуживает особого внимания, так как может открыть новое направление в совершенствовании процесса резания практически без дополнительных затрат, связанных с геометрическими и прочностными характеристиками современных режущих твердосплавных и иных пластин с упрочненными поверхностями. Требуется дополнительные теоретические, вычислительные и экспериментальные работы для подтверждения (или опровержения) найденного эффекта. Допускаем, что дополнительный углубленный анализ цикла работ немецких коллег по экспериментальному определению рациональных режимов резания может быть весьма полезен в данном случае.

Представленные результаты исследований являются основой для моделирования высокоскоростных процессов лезвийной обработки древесных материалов при определении значимых выходных параметров для предприятий ОАО «Речицадрев», ЗАО «Молодечномебель», филиала «Вилейской мебельной фабрики» и других деревообрабатывающих предприятий.

## Библиографический список

1. Методика моделирования процесса механической обработки древесных материалов фрезерованием в пакете LS-DYNA / В. В. Раповец, А. А. Гришкевич,

С. В. Медведев [и др.] // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : Труды X Международн. евразийск. Симпозиума. – Екатеринбург. – 2015. – С. 170–176.

2. Huang, J. M. An Evalution of Chip Separation Criteria for FEM Simulation of Machining / J. M. Huang, J. T. Black // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1996. – Pp. 545–554.

3. Application of 2D FEM to Chip Formation in Orthogonal Cutting / E. Ceretti, P. Fallbohmer, W. T. Wu, T. R. Atlan // Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – Pp. 169–180.

4. Раповец, В. В. Вычислительные эксперименты высокоскоростной лезвийной обработки древесины / В. В. Раповец // Труды БГТУ : Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – Сер. 1. – 2017. – № 2 (198). – С. 360–364.

5. LS-DYNA : keyword user's manual / Livermore Software Technology Corporation, 2007. – V. 971. – 2196 pp.

6. Totis, G. Efficient Evaluation of Process Stability in Milling With Spindle Speed Variation by Using the Chebyshev Collocation Method / G. Totis, P. Albertelli, M. Monno // J. Sound Vib. – 2014. – № 333(3). – Pp. 646–668.

7. Пантелеев, А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах : учебное пособие / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. – 2-е изд. – Москва : Высш. шк., 2005. – 544 с.

8. Kiss, A. K. Effects of Varying Dynamics of Flexible Workpieces in Milling Operations / A. K. Kiss, D. Bachrathy, S. Gabor // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2020. – № 142 (1). – Pp. 144–155.

9. Раповец, В. В. Методика расчета мощности в программной среде LS-DYNA через мгновенные значения сил и скоростей резания при фрезеровании древесины / В. В. Раповец // Труды БГТУ : Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – Сер. 1. – 2018. – № 2 (210). – С. 290–295.

**УДК 674.028.9+674.049.2**

**О. А. Рублева<sup>1</sup>, А. Г. Гороховский<sup>2</sup>, Е. Е. Шишкина**  
(О. А. Rubleva<sup>1</sup>, A. G. Gorokhovskiy<sup>2</sup>, E. E. Shishkina<sup>2</sup>)  
(<sup>1</sup>ВятГУ, г. Киров, РФ; <sup>2</sup>УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ)  
E-mail для связи с авторами: olga\_ru@vyatsu.ru

# **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТОРЦОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ШИПОВ**

## **METHODOLOGY FOR DETERMINING THE RATIONAL VALUES OF THE MODE PARAMETERS OF THE LONGITUDINAL TENON-PRESSING PROCESS**

*Для определения рациональных значений режимных параметров процесса торцового прессования шипов использована методика, основанная на параметрической оптимизации по методу обобщенного приведенного градиента. Обобщенная целевая функция построена на основе регрессионных моделей, описывающих выходные параметры объекта оптимизации: усилие прессования, твердость дна проушин, глубину деформированной зоны. В результате решения оптимизационной задачи для образцов из древесины сосны получены значения управляющих факторов  $W = 10,6 \%$ ,  $h_n = 11$  мм,*